

東北地方における火山灰質土の不飽和力学挙動に関する研究

著者	清原 雄康
号	53
学位授与番号	4066
URL	http://hdl.handle.net/10097/42480

きよはら ゆうこう

氏 名 清 原 雄 康

授 与 学 位 博士 (工学)

学位授与年月日 平成20年12月10日

学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 土木工学専攻

学 位 論 文 題 目 東北地方における火山灰質土の不飽和力学挙動に関する研究

指 導 教 員 東北大学教授 風間 基樹

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 風間 基樹 東北大学教授 京谷 孝史
 東北大学教授 西村 修 東北大学准教授 李 玉友
 東北大学准教授 渦岡 良介

論 文 内 容 要 旨

軽石混じりの火山灰質粗粒土からなる斜面が降雨時、地震時に崩壊した事例が多数報告されているが、そのような地盤の地震を受ける前の初期状態における土中水分状態や雨水浸透による間隙水圧の上昇過程など、初期の安定性に関する情報はあまり知られていない。火山灰質土は特有の水分特性を有し (図-1 参照)、透水性や強度と密接に関わっており、その把握が必要である。また、地盤への汚染物質の漏洩問題や廃棄物処分場でのキャピラリーバリア (上部排水層に砂、下部遮断層に礫を層状に配し毛管力の差を利用して、所定の勾配下で側方排水を促進させ雨水の鉛直浸透を制御する技術) のような雨水浸透制御対策、遮水材としての性能を考える上でも、不飽和状態下の水分移動挙動を正確に把握することが必要である。ロームの場合、鋭敏比が高く建設発生土として再利用するには安定処理などの地盤改良が必要となる。攪乱による土粒子配列や土粒子の集合状態、間隙構造の変化により、土粒子間の保水形態が変化し、サクシオン由来の強度特性も変化する。地盤の支持力評価や切盛土斜面の安定解析、廃棄物処分場底面遮水材としての強度、透水性等の機能評価に際しては、その地盤の保水特性、圧密特性やせん断特性を精度良く求めることが必要である。

本研究では、軽石混じり火山灰質粗粒土である八戸しらす、築館土と、火山灰質粘性土である八戸ローム、青葉山ロームを用いて、その物理化学的性質、重金属吸着特性を把握するとともに、降雨時浸透挙動や初期水分量、土粒子構造の違いによる強度特性に関して、不飽和地盤工学的見知から研究を行い、挙動評価や有効利用可能性に関する研究を行った。本論文の研究テーマは (1) 火山灰質土からなる野外人工盛土の水分移動モニタリング (2) 保水性の高い火山灰質土を対象とした飽和・不飽和浸透流解析 (3) 八戸しらすのキャピラリーバリア覆土材料としての有効利用 (4) 初期水分を考慮したロームの不飽和

強度特性に関する研究の4項目からなる。

以下に各項目の内容について説明する。

(1) 火山灰質土からなる野外人工盛土の水分移動モニタリング

火山灰質地盤における降雨時浸透挙動を把握するために、過去に斜面崩壊を引き起こした八戸しらす、築館土を用いて、野外に人工盛土を作製し、その中に誘電率型土壌水分計を埋設し自然降雨による浸透特性や水分特性を把握した。また、2004年から2005年6月までは植栽無し、2005年7月から植栽有りで試験を行い浸透挙動の比較も行った。

八戸しらすの場合、降雨時には斜面に平行な方向への雨水の浸

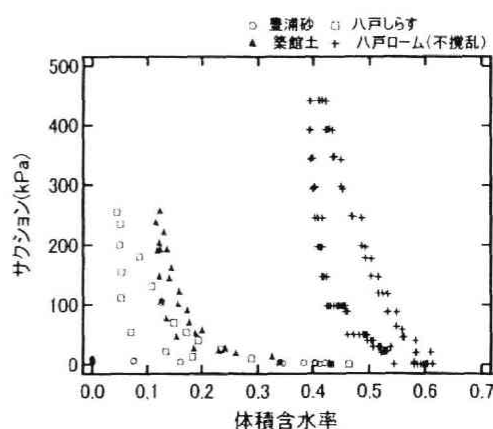


図-1 火山灰質土の水分特性

透挙動をとり、体積含水率の最大値は約 42%で、間隙率が 52%に対し、空気封入率は約 20%であった。築館土の場合、肩付近からの浸透が卓越し、盛土内部は常に高い飽和度を維持する挙動が観察された。体積含水率の最大値は約 40%で、間隙率が 44%に対し、空気封入率は約 10%であった。間隙比や細粒分含有率の違いによりこのような差が生じたものと思われる。体積含水率の変化挙動から求めた土粒子空隙での貯留率は、八戸しらすで最大 80%、築館土で最大 90%であった。

また、八戸しらすの場合はピークに至る 5 時間程度前、築館土の場合はピークに至る 6~8 時間前からの雨量がピーク値に影響を与える事が分かった。これらデータは斜面崩壊に対する危険度予測にも役立つものと思われる。

体積含水率の変化速度について植栽前の 2004 年 7 月~2005 年 6 月と植栽後の 2005 年 7 月~2006 年 12 月のデータを比較したところ、八戸しらす、築館土とも植栽後の方が減少速度が相対的に 10%ほど増加する傾向が明らかになった。

降雨時の盛土内の体積含水率の経年的な変化についてみると、八戸しらすについて θ が 38%以上、築館土については 35%以上になる連続雨量の敷居値は、2004 年より 2005 年以降の方が大きくなり、それら基準を超える頻度は少なくなる傾向にあった。特に築館土において、各測点 P1~P6 での浸透挙動は 2004 年と 2005 年以降で違いが見られた。この原因として、雨水浸透による細粒分の移動、流失や凍結、土粒子構造の安定化などが考えられる。

(2) 保水性の高い火山灰質土を対象とした飽和・不飽和浸透流解析

土中の水分特性履歴、蒸発散も考慮した飽和・不飽和浸透流解析コードを新たに開発し、飽和透水係数に封入空気の影響を考慮しない Type1、考慮した Type2 について八戸しらす、築館土、八戸ローム、豊浦砂の物性値を基に浸透挙動の解析を行った。図-2 に浸透挙動の実測値と解析値を示した。

野外人工盛土の実測値と解析値の比較を行ったところ、降雨時の浸透挙動を良好に把握できた。また築館土は八戸しらすに比べ保水性が高いことが確認された。さらに、透水性が大きく保水性が小さい豊浦砂の物性値を用いたケースでは、体積含水率は急激に変動し、透水性が小さく、保水性が大きい八戸ロームの物性値を用いたケースでは、降雨後、長期間水分が保水される様子が分かった。また、これらの材料は水分履歴の変化が、八戸しらすや築館土に比べて、小さいことが分かった。

(3) 八戸しらすのキャピラリーバリア覆土材料としての

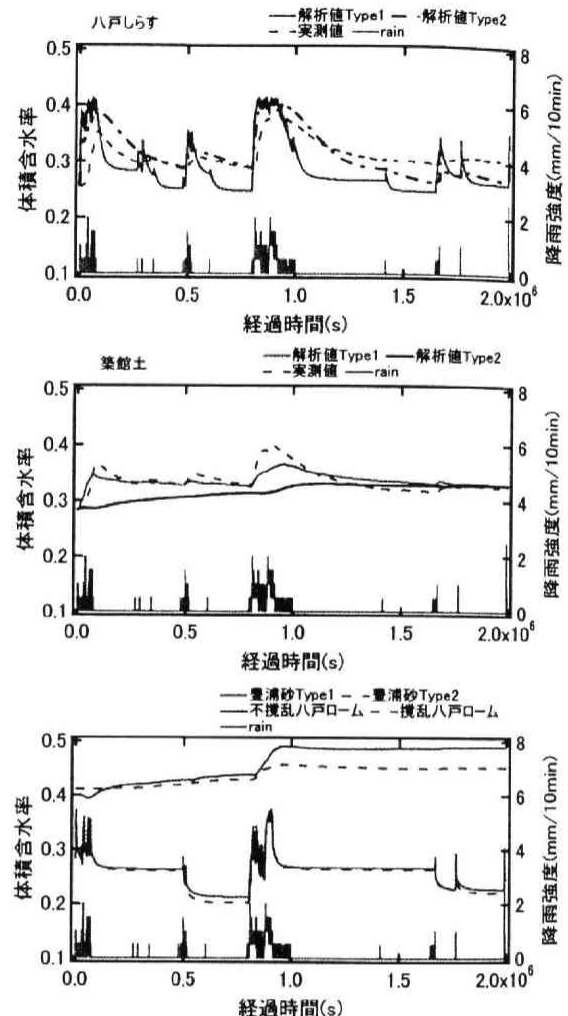


図-2 降雨時の盛土内体積含水率の実測値と解析値

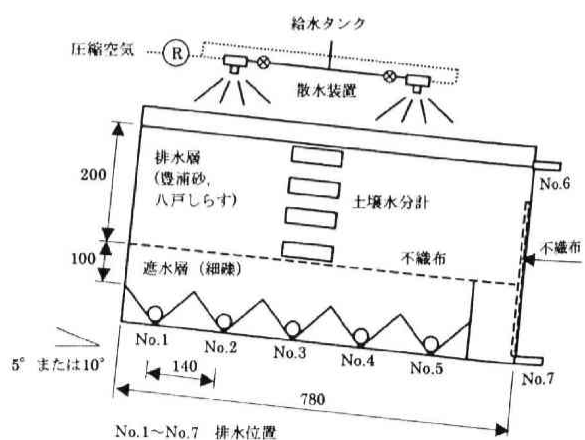


図-3 キャピラリーバリア模型概要図

有効利用

盛立て式最終処分場でのキャピラリーバリア材料としての八戸しらすの有効利用可能性、浸透挙動を把握するために、模型試験、不飽和浸透流解析等を行った。模型試験は図-3に示したような装置を用いて、傾斜角を 5° 、 10° とし、降雨強度を $5\sim 40\text{mm/h}$ まで変化させて行った。八戸しらす、豊浦砂を上部排水材としてそれぞれ用い、両者の性能比較をした。

模型試験の結果、高降雨強度では、豊浦砂より不飽和透水係数が小さく降雨強度や勾配の影響を受けにくい八戸しらすの方が、有利に働いた(図-4参照)。また、Kungの限界長理論式(1)による評価では、実浸透量を少なく抑えられる八戸しらすの方が豊浦砂より分離性能が優れるという結果が得られた。

$$L = K_s \cdot \frac{(h_{ae} - h_{ae}^*) \cdot \sin 2\phi}{2 \cdot q_v} \quad (1)$$

ここで、 L ：限界長、 K_s ：飽和透水係数、 h_{ae} ：排水材の空気侵入値(細礫：1cm)、 h_{ae}^* ：遮水材の空気侵入値(八戸しらす：35cm、豊浦砂：15cm)、 ϕ ：傾斜角、 q_v ：浸透量である。

また飽和不飽和浸透流解析コードPlaxFlowによる解析を行い、室内模型実験により得られた実測値と比較したところ、八戸しらすの場合は誤差20%以内、豊浦砂の場合は誤差10%以内の概ね良好な整合性が得られた。特に均等係数が小さく、材料の不均一性の影響が小さいと思われる豊浦砂において良好であった。

(4) 初期水分を考慮したロームの不飽和強度特性に関する研究

八戸ローム、青葉山ロームを用いて、攪乱・不攪乱といった土粒子構造や初期水分量の違いに基づく水分特性の変化や力学特性との関係を明らかにした。初期サクシオンを0, 50, 90kPa、拘束圧を0, 10, 100kN/m²として、排気非排水の不飽和三軸試験により、水分特性、Bishop式から求めた有効応力と間隙比の関係、せん断強度特性の変化を定量的に把握するとともに、サクシオンの存在形態について考察した。

サクシオンと破壊時せん断強度について、Fredlundらが提案した破壊時のせん断応力式から算出した破壊時せん断応力(図-5中の τ)と、三軸試験結果から得られた破壊時せん断応力(図-5中のMC)はほぼ同じ関係にあり、Fredlund式のパラメータ設定の妥当性が確認できた。不攪乱土の破壊時せん断応力に対するサクシオンの寄与率は基底応力0, 10kN/m²において、0.57~0.85であった。拘束圧100kN/m²においてはせん断中に正の間隙水圧が発生し、特有の傾向となった。攪乱土では基底応力0, 10, 100kN/m²において、0.15, 0.32, 0.92と拘束圧が大きくなるほど寄与率も大きくなった。また、不攪乱の方が攪乱よりサクシオンに対する寄与率が高いことが分かった。

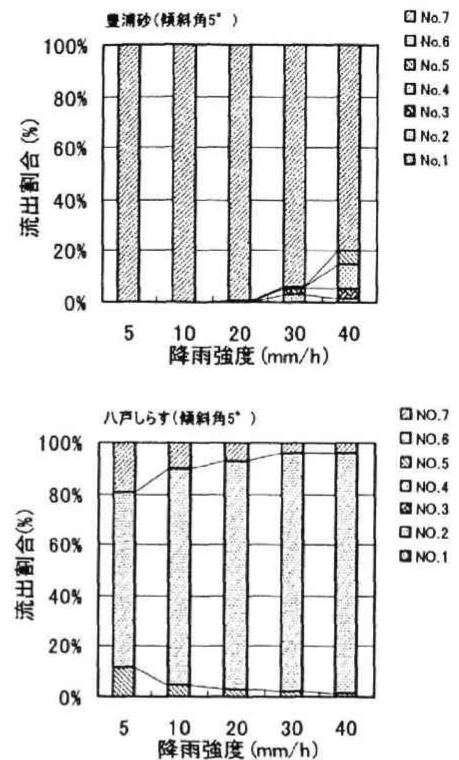


図-4 模型土槽からの流出割合

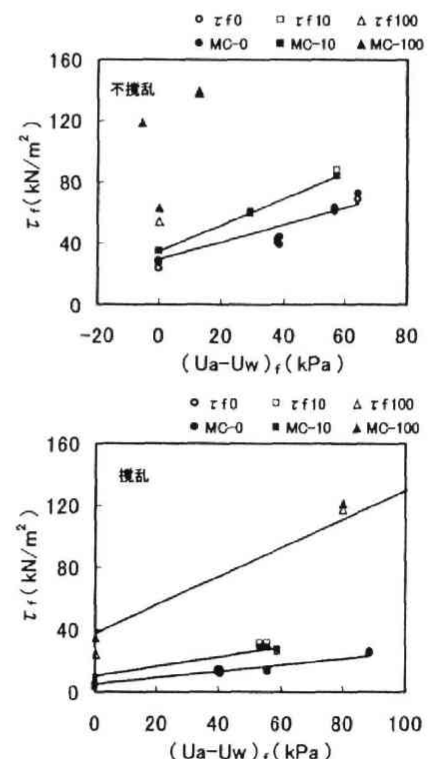


図-5 八戸ロームのサクシオンに対する破壊時せん断応力の関係

不攪乱土でのサクシオンは、団粒内部に保水されていた水分の浸出により破壊までは間隙比や飽和度にあまり依存せず低下し、破壊後は、拘束圧 100kN/m^2 の場合において間隙比の顕著な低下が生じ、それに伴う飽和度増加によると思われるサクシオン低下が続いた。それ以外の場合は間隙比増加に伴い飽和度が減少しながら、サクシオンはわずかに低下する傾向にあった。拘束圧 0kN/m^2 では軸ひずみ進行に伴い、せん断初期での有効応力増加により若干の間隙比低下（収縮）傾向を示し、初期飽和度が $75\sim 80\%$ と高い状態でサクシオンの低下が生じた（図-6、図-7 参照）。破壊後はサクシオン、飽和度の低下に伴う有効応力の低下により、間隙比が一意的に増加する傾向にあった（図-7 参照）。

一方、攪乱土でのサクシオンでは、いずれの試験条件でも間隙比や飽和度に対してサクシオンはほとんど低下しなかった。そして拘束圧 10kN/m^2 以上では、せん断初期から間隙比が低下し飽和度が増加する傾向にあったが、初期飽和度が 55% と低かったため、間隙の減少によるメニスカス力増加の影響と思われるサクシオンの上昇が生じた（図-8、図-9 参照）。サクシオンは、せん断初期の体積収縮時に若干低下し、破壊前後でほとんど変化しないまま、間隙比のみ小さくなる変化をした。 100kN/m^2 では初期飽和度が 60% と低い状態で、有効応力増加に伴い $50, 90\text{kPa}$ いずれのサクシオン条件でも間隙比はほぼ一意的に小さくなり、サクシオン、飽和度とも増加した。拘束圧が大きくなるほど間隙比が低下し、サクシオン増加量も大きくなる傾向にあった（図-9 参照）。

以上、東北地方を代表する火山灰質土を用いて、不飽和力学的見知からの研究成果が得られた。

八戸しらす、築館土の降雨時浸透挙動を調べたところ、降雨パターンや植栽の影響、経年的な変化、水分特性履歴などを把握できた。また、土粒子構造を反映する水分特性やその履歴が予測解析結果に影響を及ぼすことが分かった。

不飽和浸透挙動を利用して八戸しらすのキャピラリーバリア材としての有効利用可能性について検討したところ、表面流出の影響により特に高降雨強度において性能が発揮できることが分かった。また、解析による現象再現も良好に行われた。

不飽和三軸試験により、八戸ROOM、青葉山ROOMの土粒子構造の違いとサクシオンがせん断強度、変形に及ぼす影響、せん断時の構造変化を反映した水分特性などを把握できた。

これら成果は降雨時の斜面安定性評価や沈下予測、強度試験の精度向上に大いに役立つ。

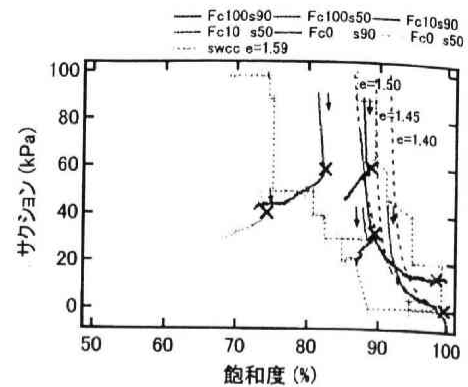


図-6 不攪乱八戸ROOMのせん断時水分特性履歴

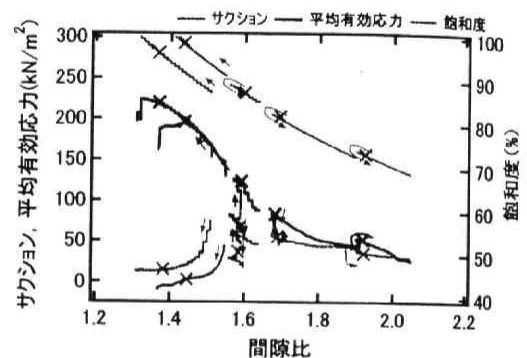


図-7 不攪乱八戸ROOMの間隙比に対する有効応力、サクシオン、飽和度の関係

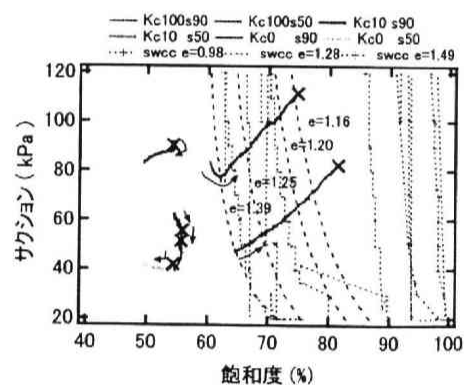


図-8 攪乱八戸ROOMのせん断時水分特性履歴

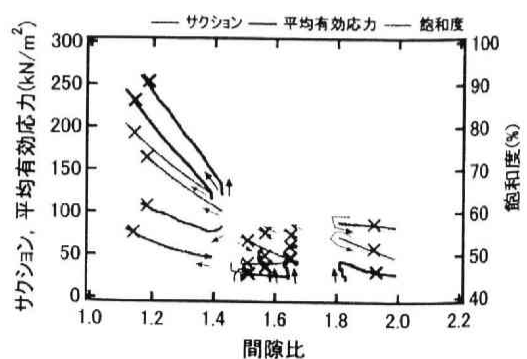


図-9 攪乱八戸ROOMの間隙比に対する有効応力、サクシオン、飽和度の関係

論文審査結果の要旨

火山灰質土は特有の水分保持特性を有し、その性質は不飽和状態下での透水性や強度・変形特性などの力学挙動と密接に関わっている。本研究では、東北地方に存在する火山灰質土を対象として、不飽和土の力学の観点から、それらで構成された地盤の降雨時浸透挙動、初期水分量・土粒子構造の違いによる強度変形特性を研究したものであり、全8章よりなる。

第1章は、火山灰質土の不飽和力学挙動に関係する現象を整理し、これを研究する必要性を示している。

第2章は、火山灰質土に関する従来の研究、技術動向を整理している。

第3章では、ここで対象とした東北地方の火山灰質土の物理特性・化学特性を示し、その特徴、分類を示している。

第4章では、野外人工盛土を用いた水分モニタリング結果から火山灰質地盤における降雨時浸透挙動を把握し、間隙比や細粒分含有率の違いにより盛土の体積含水率や空気封入率に経年的に差が生じること、植栽の有無による降雨浸透挙動に違いがあることを見出している。雨水浸透による細粒分の移動、流失や凍結によって土粒子構造が安定化することが示唆されていることは重要な知見である。

第5章では、保水性の高い土を対象とした土中の水分特性履歴、蒸発散を考慮した飽和・不飽和浸透流解析コードを新たに開発し、野外人工盛土の水分量の変化を解析している。手法の妥当性は野外盛土の観測結果のシミュレーションによって確認している。

第6章では、不飽和浸透挙動を利用したキャピラリーバリア材として、八戸しらすの有効利用可能性を実験的・解析的に検討している。その結果、八戸しらすは不飽和透水係数が小さく表面流出量が多くなるため、特に高降雨強度において高い遮水性能が発揮できることを明らかにしている。

第7章では、八戸ローム、青葉山ロームを用いて、攪乱・不攪乱といった土粒子構造や初期水分量の違いに基づく水分特性変化とせん断強度・変形特性との関係を検討している。不攪乱土の破壊時せん断応力に対するサクシジョンの寄与率が攪乱土より大きいことなどを明らかにしている。この結果は、ローム土の練り返しによるせん断強度の低下を理解する上で重要な知見である。

第8章は、本研究の結論および今後の展望について述べている。

以上、本論文は東北地方を代表する火山灰質土を用いて、不飽和土の力学の観点から、その降雨時浸透特性、せん断強度変形特性を明らかにしたものである。火山灰質土の力学挙動を不飽和土の観点からアプローチした本研究の成果は、地盤工学の発展、東北地方の火山灰質土の工学的利用に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。